

# Über die Sortierung durch Luftkräfte

Blenk, Hermann

Veröffentlicht in:  
Abhandlungen der Braunschweigischen  
Wissenschaftlichen Gesellschaft Band 1, 1949, S. 76-82



Friedr. Vieweg & Sohn, Braunschweig

## Über die Sortierung durch Luftkräfte\*)

Von Hermann Blenk

The same differential equations are valid for all apparatus in which the weight and the air forces due to the relative motion of grain and air are used in the sorting process. The velocity of sinking is found to be the only determining factor. The advantages and disadvantages of the different apparatus are discussed and a new method for testing their aerodynamic quality is suggested.

Die Ausnutzung von Luftkräften zur Reinigung von Getreide und zur Aufbereitung von Saatgut ist schon uralte. Jeder Bauer, der sein Getreide über die Tenne warf, nutzte bewußt oder unbewußt die Luftkräfte dazu aus, das Getreide von Unkraut und sonstigen Verunreinigungen zu befreien und in Güteklassen zu trennen. Ob er dabei die Scheunentore öffnete, um den natürlichen Wind zur Mitwirkung heranzuziehen, oder ob er die Scheunentore geschlossen hielt, weil er durch gleichmäßigen Wurf eine bessere Sortierung erhoffte als durch den ewig schwankenden Wind, ist grundsätzlich einerlei; in jedem Falle unterlag jedes einzelne Korn außer der Schwerkraft einer Luftkraft, die nur von der Relativbewegung des Korns gegenüber der Luft abhängt.

In neuerer Zeit bedient man sich zur Reinigung und Sortierung von Getreide verschiedenartiger Geräte, die alle den Zweck verfolgen, den Vorgang des Worfens technisch gleichmäßiger zu gestalten und den persönlichen Einfluß des jeweiligen Arbeiters, der das Worfeln zu besorgen hat, auszuschalten. Bei den sogenannten *Windfegen* muß das Korn einen begrenzten, im wesentlichen horizontalen Luftstrom durchfallen; die Sortierung ergibt sich aus der verschieden starken Ablenkung der Körner. In den sogenannten *Steigsichtern* wird ein vertikaler Luftstrom verwandt; dieser hebt aus dem von der Seite her zugeführten Korn einen gewissen Teil heraus und besorgt dadurch die gewünschte Sortierung. Wenn man den vertikalen Luftstrom konisch anordnet, so daß seine Geschwindigkeit mit der Höhe abnimmt, kann man die Körner in verschiedener Höhe einigermaßen zum Schweben bringen und durch seitliche Abführung sortieren. Während bei Windfegen und Steigsichtern der wirksame Luftstrom durch ein Gebläse erzeugt werden muß, schafft sich das Korn, das von einer *Schleuder* abgeworfen wird, den relativen Wind durch seine Eigenbewegung selbst. Auf die Vor- und Nachteile dieser Geräte soll noch näher eingegangen werden (Abschnitt 2), nachdem der physikalische Vorgang des Sortierens durch Luftkräfte genauer untersucht ist (Abschnitt 1). In Abschnitt 3 wird schließlich ein neuer Vorschlag zur Prüfung der verschiedenen Sortierungsgeräte gemacht.

\*) Diese Mitteilung verdankt ihre Entstehung einer Zusammenarbeit mit dem Institut für Landtechnische Grundlagenforschung (Leiter: Prof. Dr.-Ing. W. Kloth) in der Landwirtschaftlichen Forschungsanstalt Braunschweig-Völkenrode. Über die ausgeführten Versuche wird an anderer Stelle berichtet werden.

## 1. Theoretische Grundlagen

In der einschlägigen Literatur (vgl. das Verzeichnis am Ende dieser Mitteilung) wird immer wieder die Frage erörtert, nach welchen Gesichtspunkten die Sortierung durch Luftkräfte vor sich geht, obwohl mindestens seit den Arbeiten von W. Brenner<sup>3)</sup> und E. Wörmann-Weber<sup>4)</sup> grundsätzliche Klarheit über diese Frage besteht. Es mag deshalb nicht überflüssig sein, auf die theoretische Seite des Problems noch einmal einzugehen, zumal da es möglich ist, eine noch allgemeinere Basis als in den genannten Arbeiten zu gewinnen und eine recht anschauliche Größe als allein maßgeblich in den Vordergrund zu rücken.

Bei allen Geräten und Verfahren, die eine Windsortierung bezwecken — einerlei, ob das Korn durch die Luft geworfen wird und sich den Gegenwind gewissermaßen selbst erzeugt, oder ob das Korn horizontal, schräg oder vertikal angeblasen wird —, immer unterliegt das Korn lediglich zwei Kräften: seinem Gewicht und der Luftkraft, die infolge der Relativbewegung zwischen Korn und Luft auftritt. Bezeichnen wir die Masse des Kornes mit  $m$ , seine Geschwindigkeit relativ zu einem erdfesten System durch den Vektor  $\mathbf{v}$ , die Erdbeschleunigung mit  $g$  und die Luftkraft mit  $\mathfrak{L}$ , so lautet die Bewegungsgleichung:

$$m \dot{\mathbf{v}} = m\mathbf{g} + \mathfrak{L}.$$

Wir wollen uns zunächst auf den einfachsten Fall einer nichtrotierenden Kugel beschränken, bei der die wirkende Luftkraft  $\mathfrak{L}$  nur in einem Widerstand  $\mathfrak{W}$  besteht, der in die Richtung der relativen Geschwindigkeit  $\mathbf{v}_{\text{rel}}$  zwischen Kugel und Luft fällt. Wir wollen ferner voraussetzen, daß die Bewegung der Luft, gegeben durch den Geschwindigkeitsvektor  $\mathbf{v}_L$ , in der gleichen Vertikalebene verläuft wie die Bewegung des Kornes. Die Relativgeschwindigkeit  $\mathbf{v}_{\text{rel}}$  ergibt sich dann aus:

$$\mathbf{v}_{\text{rel}} = \mathbf{v} - \mathbf{v}_L.$$

Durch Komponentenzerlegung in eine horizontale  $x$ -Richtung und eine vertikale  $z$ -Richtung (positiv nach unten) ergeben sich nun die Bewegungsgleichungen in folgender Form:

$$\left. \begin{aligned} m\ddot{x} &= m\dot{u} = & W \cos \alpha \\ m\ddot{z} &= m\dot{w} = m\mathbf{g} - W \sin \alpha \end{aligned} \right\}.$$

Zerlegen wir  $\mathbf{v}$  in die Komponenten  $u$  und  $w$ , ebenso  $\mathbf{v}_L$  in  $u_L$  und  $w_L$  und  $\mathbf{v}_{\text{rel}}$  in  $u_{\text{rel}}$  und  $w_{\text{rel}}$ , so wird:

$$\left. \begin{aligned} u_{\text{rel}} &= u - u_L \\ w_{\text{rel}} &= w - w_L \end{aligned} \right\} \quad \text{tg } \alpha = \frac{w - w_L}{u - u_L}.$$

Die Relativgeschwindigkeit  $\mathbf{v}_{\text{rel}}$  hat den absoluten Betrag

$$v_{\text{rel}} = \sqrt{(u - u_L)^2 + (w - w_L)^2}.$$

Da wir es bei der Sortierung von Getreide mit recht kleinen Körpern und gleichzeitig mit verhältnismäßig kleinen Geschwindigkeiten zu tun haben, liegen die Reynoldsschen Kennzahlen sehr niedrig, etwa zwischen 100 und 1000. Wir befinden uns also in dem Gebiet, in dem das Widerstandsgesetz von der linearen

<sup>3)</sup> Wissenschaftl. Abhandl.

zur quadratischen Form übergeht\*). Um beiden Möglichkeiten Rechnung zu tragen, setzen wir den Widerstand in folgender Form an:

$$W = k v_{\text{rel}}^n.$$

Hierin ist sowohl die Stokessche Formel

$$W = 6 \pi \mu R v_{\text{rel}}$$

( $\mu$  = Zähigkeit des Mediums,  $R$  = Radius der Kugel) als auch die bekannte quadratische Formel

$$W = c_w \frac{\rho}{2} F v_{\text{rel}}^2$$

( $c_w$  = Widerstandsbeizahl,  $F$  = Querschnittsfläche,  $\rho$  = Dichte des Mediums) enthalten.

Die Bewegungsgleichungen nehmen nunmehr folgende Form an:

$$\begin{aligned} m \ddot{x} &= m \dot{u} = k (u - u_L) v_{\text{rel}}^{n-1} \\ m \ddot{z} &= m \dot{w} = m g - k (w - w_L) v_{\text{rel}}^{n-1} \end{aligned}$$

Läßt man die Kugel in ruhender Luft frei fallen, so erreicht sie schließlich (exakt nach unendlich langer Zeit) die Geschwindigkeit

$$w_{\infty} = \sqrt[n]{\frac{m g}{k}},$$

wie man aus den Bewegungsgleichungen für  $\dot{u} = \dot{w} = 0$ ,  $u_L = w_L = 0$ ,  $v_{\text{rel}} = w$  oder aus der Gleichsetzung von Gewicht  $G = m g$  und Widerstand  $k v_{\text{rel}}^n$  leicht ermittelt. Diese Geschwindigkeit wird Sink- oder auch Schwebegeschwindigkeit genannt, da ein senkrecht aufsteigender Luftstrom von der Geschwindigkeit  $w_{\infty}$  die Kugel zum Schweben bringt. Führt man  $w_{\infty}$  in die Bewegungsgleichungen ein, so nehmen diese folgende dimensionslose Gestalt an:

$$\begin{aligned} \frac{\dot{u}}{g} &= \frac{u - u_L}{w_{\infty}} \left[ \left( \frac{u - u_L}{w_{\infty}} \right)^2 + \left( \frac{w - w_L}{w_{\infty}} \right)^2 \right]^{\frac{n-1}{2}} \\ \frac{\dot{w}}{g} &= 1 - \frac{w - w_L}{w_{\infty}} \left[ \left( \frac{u - u_L}{w_{\infty}} \right)^2 + \left( \frac{w - w_L}{w_{\infty}} \right)^2 \right]^{\frac{n-1}{2}} \end{aligned}$$

In dieser Form gelten die Gleichungen sowohl für Windfegen ( $u_L \neq 0$ ,  $w_L = 0$ ) und Steigsichter ( $u_L = 0$ ,  $w_L \neq 0$ ) als auch für Schleudereinrichtungen ( $u_L = w_L = 0$ ). Die Anfangsbedingungen sind selbstverständlich von Fall zu Fall verschieden.

Aus den abgeleiteten Gleichungen sieht man, daß für den Sortierungsvorgang die Sinkgeschwindigkeit  $w_{\infty}$  die allein maßgebliche physikalische Größe ist.

\*) Vgl. etwa Handbuch der Physik von Geiger und Scheel, Bd. VII, S. 168. Berlin 1927.

Legt man das quadratische Widerstandsgesetz zugrunde, wie es E. Wörmann-Weber und W. Brenner in den genannten Arbeiten getan haben, so sieht man, daß es praktisch auf die Größe  $\frac{G}{c_w F}$  ankommt. Dieser Quotient wird von Wörmann-Weber als „Schwerfälligkeit“ und von Brenner als „Flugkoeffizient“ eingeführt und in beiden Arbeiten eingehend erörtert. Trotzdem findet man in späteren Arbeiten noch den unklaren Begriff „Windschwere“ und sucht vergebens nach einer Definition oder einer Angabe, wie und in welchen Einheiten diese Größe gemessen werden kann.

Da, wie oben schon erwähnt, für die Getreidesortierung sehr niedrige Reynoldssche Kennzahlen in Frage kommen und das quadratische Gesetz deshalb nicht allgemein als gültig vorausgesetzt werden kann, dürfte es zweckmäßig sein, an Stelle des Quotienten  $\frac{G}{c_w F}$  künftig die Sinkgeschwindigkeit  $w_\infty$  als maßgebliche physikalische Größe zu benutzen. Sie hat außerdem den Vorzug größerer Anschaulichkeit. Zwei Körper, die sich durch ihre Form, ihre Größe und ihr Gewicht irgendwie unterscheiden, die aber die gleiche Sinkgeschwindigkeit  $w_\infty$  haben, können durch ein Gerät, bei dem außer der Schwerkraft nur Luftkräfte zur Wirkung kommen, nicht getrennt werden. Je größer der Unterschied in den Sinkgeschwindigkeiten ist, um so leichter muß die Trennung zu bewerkstelligen sein.

Wir haben uns bisher auf die Betrachtung nichtrotierender Kugeln beschränkt. Handelt es sich aber um Getreidekörner, so wird der zu untersuchende Sortierungsvorgang im allgemeinen viel verwickelter. Bei gleicher Geschwindigkeit  $v_{rel}$  ist der Widerstand jetzt noch abhängig von der Anblaserichtung, und außerdem können noch Luftkräfte in zur Anblaserichtung senkrechten Richtungen und Drehmomente um alle Achsen auftreten. W. Brenner<sup>3)</sup> hat festgestellt, daß das Produkt  $c_w F$ , abhängig von der Anblaserichtung, sich für die extremsten Stellungen (Längs- und Querlage des Kornes) bei Weizen wie 1 : 5 und bei Hafer wie 1 : 9 verhält. Falls die Körner mit zeitlich konstanter relativer Anblaserichtung durch den Luftstrom fallen und die extremen Lagen dabei in natürlicher Häufigkeit vorkommen, müßte man nach diesen Zahlen sehr große Streuungen erwarten. Die von Brenner angestellten Versuche haben aber eine wesentlich geringere Streuung als die erwartete ergeben. Dies ist zweifellos dadurch zu erklären, daß die Körner sich entweder in dauernder Drehung befinden oder doch wenigstens um eine Gleichgewichtslage hin und her pendeln. Die in der Arbeit von Teuber<sup>5)</sup> wiedergegebenen Filmaufnahmen von fliegenden Körnern zeigen im allgemeinen heftige Drehbewegungen, in einigen Fällen aber auch Anfänge von Pendelungen. Die Zahl der Filmbilder reicht aber nicht aus, um die Gleichgewichtslage, die Frequenz und die Dämpfung (bzw. Anfachung) dieser Pendelungen abzuschätzen. Die Drehung der Körner wird zur Folge haben, daß irgendein Mittelwert des Widerstandes praktisch wirksam ist. Bei den Pendelungen wird der wirksame Mittelwert von der Gleichgewichtslage, um die das Korn pendelt, abhängen. Da diese Gleichgewichtslage kaum mit einer der extremen Lagen zusammenfallen dürfte, ist auch hier ein mittlerer Wert für den Widerstand zu erwarten. Die gegebenenfalls auftretenden, zur Widerstandsrichtung senkrechten Luftkraftkomponenten werden sich auf alle

Richtungen gleichmäßig verteilen und infolgedessen die Sortierung im Mittel nicht beeinflussen, sondern sich nur in einer erhöhten Streuung auswirken. Das gleiche gilt von den Drehmomenten.

Diese Betrachtung führt zu der Erkenntnis, daß der Sortierungsvorgang bei unsymmetrischen Körpern sich grundsätzlich ähnlich verhält wie bei Kugeln. Man muß bei den unsymmetrischen Körpern nur mit größeren Streuungen rechnen, und zwar sowohl wenn man (bei Versuchen) dasselbe Korn mehrfach dem gleichen Sortierungsvorgang unterwirft als auch wenn man (in der Praxis) eine gewisse Menge Korn für Saatzwecke zu sortieren hat. Die in einem Windkanal angestellten Versuche haben diese Behauptung bestätigt. Auf die Versuchsergebnisse soll jedoch hier nicht näher eingegangen werden.

## 2. Vergleich der Geräte

Wenn man sich die Frage vorlegt, welches der obengenannten Geräte zur Getreidesortierung wohl das geeignetste ist, so wird man von folgender Übersicht ausgehen können:

	Relativer Wind vertikal	Relativer Wind hauptsächlich horizontal
Luft wird bewegt (Gebläse)	Steigsichter	Windfege*)
Korn wird bewegt	(Freier Fall)	Worfeln bzw. Schleuder

Wenn die Relativgeschwindigkeit zwischen Korn und Luft hauptsächlich in die Horizontale fällt, haben Schwerkraft und Luftkraft verschiedene Richtungen (sie stehen sogar vielfach im Mittel senkrecht aufeinander); Körner mit verschiedener Sinkgeschwindigkeit durchlaufen infolgedessen eine stärker oder schwächer abgelenkte Flugbahn, und man braucht sie am Ende nur in entsprechend gebaute Fächer fallen zu lassen, um die Sortierung zu vollenden. Das gilt sowohl für die Windfege mit vorwiegend horizontalem Wind als auch für das Worfeln bzw. die Schleuder. Fällt die Relativgeschwindigkeit in die Vertikale, so wirken Luft- und Schwerkraft in der gleichen Richtung und die Flugbahn der Körner verläuft im wesentlichen vertikal, so daß zur Sortierung jeweils noch zusätzliche Einrichtungen geschaffen werden müssen. Diese beziehen sich sowohl auf das Einbringen der Körner in den Luftstrom als auch auf das Herausnehmen. Beides besorgt bei horizontaler Relativgeschwindigkeit die Schwerkraft ganz zwanglos, während bei den Steigsichtern mehr oder weniger verwickelte Vorrichtungen dazu nötig sind<sup>9, 13)</sup>. Wenn trotz dieses offensichtlichen Vorteils auf Seiten der Windfegen der Steigsichter in den beiden letzten Jahrzehnten sich in Deutschland mehr und mehr durchgesetzt

\*) Die Bezeichnung „Windfege“ wird in der Fachliteratur nicht ganz einheitlich gebraucht. Während meistens (wie in dieser Mitteilung) ein Gerät mit vorwiegend horizontalem Luftstrom gemeint ist (im Gegensatz zu den Steigsichtern), werden gelegentlich mit „Windfege“ alle mit einem Gebläse ausgerüsteten Windsortiergeräte (also einschließlich der Steigsichter) bezeichnet.

hat, so müssen wohl andere Gründe (z. B. der geringere Platzbedarf des Steigsichters) dafür maßgeblich gewesen sein. Es erscheint auch möglich, daß die Gleichmäßigkeit des Luftstroms (nach Größe und Richtung) bei den Steigsichtern deshalb größer ist als bei den Windfegen, weil man der Ausbildung des Luftstroms in den Steigsichtern im Zusammenhang mit den zusätzlichen Vorrichtungen zum Ein- und Ausbringen des Kornes größere Aufmerksamkeit schenken mußte als bei den Windfegen. Daß die Güte des Luftstroms für das Sortierungsergebnis an erster Stelle entscheidend ist, braucht kaum betont zu werden. Da man aber einen gleichmäßigen und gut ausgerichteten Luftstrom in horizontaler wie in vertikaler Richtung mit gleichem Aufwand herstellen kann (wenn auch bei den betrachteten Geräten vielleicht bisher nicht hergestellt hat), so könnte es doch sein, daß die Bevorzugung des Steigsichters in der Praxis noch nicht als endgültige Entscheidung zuungunsten der Windfegen mit vorwiegend horizontalem Luftstrom hingenommen werden muß.

Für Versuchszwecke hat der horizontale Luftstrom gegenüber dem vertikalen einen weiteren, nicht zu unterschätzenden Vorteil. Man kann bei horizontalem Luftstrom sehr leicht eine fast kontinuierliche Sortierung in beliebig fein unterteilte Klassen vornehmen, bei vertikalem Luftstrom dagegen nur in eine kleine Zahl von Klassen trennen.

Wenn man weiterhin prüft, ob es besser ist, das Korn oder die Luft zu bewegen, so findet man leicht folgende Unterschiede: Bei Bewegung des Kornes erreicht man sehr gute Anströmungsbedingungen, während jeder von einem Gebläse erzeugte Luftstrahl gewisse Ungleichmäßigkeiten und besonders in den Randzonen immer Verwirbelungen aufweist, die sich für den Sortiervorgang störend bemerkbar machen. Andererseits ist es bei den mit Gebläse arbeitenden Geräten verhältnismäßig leicht, jedem Korn die gleichen Anfangsbedingungen (gleiche Geschwindigkeit nach Größe und Richtung) zu verschaffen, während dasselbe bei den Kornschleudern recht schwierig ist. Wenn es gelingen sollte, diese Bedingungen mit erträglichem Aufwand befriedigend zu erfüllen, dürfte die Kornschleuder, also letzten Endes das Worfeln, nur in technisch vervollkommneter Form, als das beste Verfahren zur Getreidesortierung anzusehen sein.

### 3. Prüfung der Geräte

In der Praxis wird man oft vor der Frage stehen, wie man die Sortierungsschärfe eines bestimmten Gerätes beurteilen oder verschiedene Geräte auf ihre Sortierungsfähigkeit miteinander vergleichen soll<sup>12)</sup>. Wenn es bei dieser Prüfung nur auf die aerodynamische Seite ankommt, wäre zu empfehlen, hierfür kleine Kugeln zu verwenden, deren Sinkgeschwindigkeiten genau gemessen sind und den in Betracht kommenden Bereich überdecken. Als praktische Grenzen kann man die Sinkgeschwindigkeiten von Erbsen einerseits und Haferkörnern andererseits ansehen. Teilt man diesen Bereich etwa in 12 Teile und kennzeichnet die zu jedem Teilbereich gehörigen Kugeln durch eine andere Farbe, so kann man das Ergebnis jedes Sortierungsversuches mit einem Blick erkennen und auch zahlenmäßig leicht festlegen. Wichtig ist dabei, daß die Versuchskugeln ihre Größe, ihr Gewicht und sonstige Beschaffenheit unter dem Einfluß äußerer Bedingungen (Temperatur, Feuchtigkeit) nicht verändern.

### Zusammenfassung

Für alle Geräte, die zur Sortierung von Getreide die Schwerkraft und die aus der Relativbewegung zwischen Korn und Luft herrührenden Luftkräfte ausnutzen, gelten die gleichen Differentialgleichungen. Die Sinkgeschwindigkeit wird als die allein maßgebliche Größe erkannt. Die Vor- und Nachteile der verschiedenen Sortiergeräte werden besprochen und ein neues Verfahren zur Prüfung ihrer aerodynamischen Güte vorgeschlagen.

### Literatur

- <sup>1)</sup> O. Wolfenstein, Über das Sortieren von Saatgut. Diss. Göttingen 1875. Journ. f. Landwirtschaft, 25. Jahrgang, 1877.
- <sup>2)</sup> L. Klopfer, Über die maschinelle Aufbereitung von Getreide-Saatgut. Diss. Hannover 1915.
- <sup>3)</sup> W. Brenner, Beiträge zur Kenntnis des Sortier-Vorganges bei der Sichtung von Saatgetreide durch Windströme. Schriften des Reichskuratoriums für Technik in der Landwirtschaft (RKTL), Heft 2, 1928.
- <sup>4)</sup> E. Wörmann-Weber, Die physikalischen und mechanischen Grundlagen der Reinigung und Sortierung von Getreide und Sämereien unter gleichzeitiger Benutzung von Wind und Schwere. Zeitschr. f. techn. Physik 1928, S. 350.
- <sup>5)</sup> F. Th. Teuber, Untersuchung der Getreidesortierung mittels Windfège. Diss. Stuttgart 1931.
- <sup>6)</sup> H. Hertzberg, Beitrag zur Ermittlung der Sortierungsschärfe bei horizontaler Wind-sortierung. Diss. Halle 1931.
- <sup>7)</sup> W. E. Fischer, Prüfung einer Windfège mit Steigsichter. Mitt. d. Max-Eyth-Gesellschaft, Berlin 1932, Nr. 2 (Anlage zu: Die Technik in der Landwirtschaft, 1932).
- <sup>8)</sup> G. Fischer, Prüfung der Getreidereinigungsanlage „Stahlneusaat“. Mitt. d. Deutschen Landwirtschaftsgesellschaft (DLG), Berlin 1933, Stück 9, S. 176.
- <sup>9)</sup> G. Kühne, Handbuch der Landmaschinentechnik, Bd. 2 (Berlin 1934), S. 233ff.: Maschinen zur Reinigung und Sichtung von Körnern.
- <sup>10)</sup> W. E. Fischer, Windfège oder Saatgutereiniger? Ein Wort zu ihren Anwendungsbereichen. Die Technik in der Landwirtschaft 1935, S. 251.
- <sup>11)</sup> W. E. Fischer, Prüfung des Saatgutbereiters „Stahl-Neusaat 10“. Mitt. d. Max-Eyth-Gesellschaft, Berlin 1935, Nr. 4 (Anlage zu: Die Technik in der Landwirtschaft 1935).
- <sup>12)</sup> F. Stämpfig, Prüfung von Saatreinigungsmaschinen. Schriften des RKTL, Heft 68, 1936.
- <sup>13)</sup> L. Vogt, Beitrag zur Körner-Sortierung mittels Steigwind. Diss. Stuttgart 1943.